



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2011–13  
На правах рукописи

Брагута Виктор Валериевич

**Формфакторы адронов в различных  
эксклюзивных процессах**

01.04.02 — теоретическая физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико–математических наук

Протвино 2011

УДК 539.1.01

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук А.В. Бережной (НИИЯФ МГУ, г. Москва), доктор физико-математических наук А.Л. Катаев (ИЯИ РАН, г. Москва), доктор физико-математических наук В.Ф. Образцов (ИФВЭ, г. Протвино).

Ведущая организация – Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт физики высоких энергий, 2011

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

#### **Рождение тяжелых кваркониев**

Тяжелые кварконии – связанные состояния, содержащие два тяжелых кварка. В теории сильных взаимодействий (КХД) эти частицы очень похожи на состояния позитрония в квантовой электродинамике. Именно поэтому, тяжелые кварконии сыграли и продолжают играть важнейшую роль в понимании природы сильных взаимодействий.

Долгое время для объяснения экспериментальных данных было достаточно представления о том, что тяжелые кварконии состоят из кварк-антикварковой пары, находящейся в связанном состоянии, с потенциалом, который на малых расстояниях похож на кулоновский, а на больших расстояниях линейно растет. Такой подход к описанию тяжелых кваркониев позволил с хорошей точностью воспроизвести спектр этих частиц и понять многие свойства кваркониев.

В настоящее время в физике тяжелых кваркониев появилось множество совершенно новых экспериментальных данных. К этим данным можно отнести множество обнаруженных состояний кваркониев, которые нельзя объяснить в рамках общепринятой концепции, считающей кварконии – связанным состоянием кварк-антикварковой пары. К новым данным также относятся инклюзивные процессы

рождения кваркониев в адронных столкновениях, для которых разница теории и эксперимента может доходить до порядка величины. Нельзя не упомянуть также процессы рождения кваркониев, которые были измерены на В-фабриках, где различие теории и эксперимента также составляет порядок величины. Все эти данные показывают, что старых представлений о кваркониях не достаточно для понимания современных экспериментальных данных.

В современной литературе наиболее широкое распространение при изучении тяжелых кваркониев получил метод нерелятивистской КХД. Нерелятивистская КХД (нрКХД) – эффективная теория, созданная для описания различных процессов, происходящих с тяжелыми кварками, входящих в состав тяжелых кваркониев, характерные скорости которых  $v \ll 1$ . Обычно, в рамках нрКХД рассматриваются различные процессы аннигиляции или рождения тяжелых кваркониев. При таком рассмотрении в теории присутствует масштаб  $E \geq M_Q$ . Это означает, что таким процессам соответствуют расстояния  $1/E \ll 1/(M_Q v)$ , где  $1/(M_Q v)$  соответствует размеру кваркония. В связи с этим, амплитуду процесса можно разложить по параметру  $\sim M_Q v/E$ . Непертурбативная физика, параметризующая большие расстояния, содержится в матричных элементах нрКХД операторов, по которым и происходит операторное разложение. Коэффициенты этого разложения параметризуют физику малых расстояний. Константу связи на расстояниях  $\sim 1/E$  уже можно считать малой  $\alpha_s(E) \ll 1$ , поэтому коэффициенты можно раскладывать по малой константе связи, т.е. считать пертурбативно.

В подавляющем большинстве работ процессы рождения кваркониев описываются в лидирующем приближении нрКХД. Т.е. для описания сложного процесса рождения используется только один член разложения по относительной скорости  $v$ . Физически это означает, что тяжелый кварконий считается кварк-антикварковой парой, находящейся в состоянии покоя, а движением кварк-антикварковой пары в кварконии полностью пренебрегается, что, безусловно, является слишком простым взглядом на кварконий. Неудивительно, что такой упрощенный взгляд на процесс адронизации приводит к ряду расхождений предсказаний нрКХД с экспериментом. Стоит

также отметить, что если соотношение  $v \ll 1$  плохо выполняется, что справедливо для чармониев, применимость нрКХД становится сомнительной. Ввиду этого, очень важным является разработка и применение методов отличных от нрКХД и обладающих не меньшим потенциалом и строгостью результатов.

Полноценной альтернативой нрКХД является метод разложения амплитуды на световом конусе. Метод разложения амплитуды на световом конусе (РАСК) был разработан для изучения эксклюзивных процессов при больших энергиях. В этом методе амплитуда всего процесса делится на две части. Первая часть описывает процессы рождения кварков и глюонов, происходящие на маленьких расстояниях. На малых расстояниях константа сильного взаимодействия мала, поэтому эта часть амплитуды может быть разложена в ряд по малой константе связи. Вторая часть процесса рождения называется адронизацией. Она описывает превращение кварков и глюонов в наблюдаемые на эксперименте адроны. Эта часть амплитуды рождения параметризуется волновыми функциями адронов на световом конусе.

Метод РАСК может применяться для описания рождения как легких так тяжелых адронов, если известна волновая функция этих адронов. В частности, при описании рождения тяжелых кваркониев, метод имеет существенные преимущества по сравнению с нрКХД: суммирование релятивистских и лидирующих логарифмических радиационных поправок к амплитуде с помощью волновой функции тяжелых кваркониев. Релятивистские поправки очень важны при описании рождения возбужденных состояний чармониев  $(\psi', \eta'_c)$ , а лидирующие логарифмические радиационные поправки становятся очень важными при высоких энергиях.

Из вышесказанного видно, что волновые функции адронов на световом конусе являются одним из самых главных составляющих при расчете любого жесткого эксклюзивного процесса с рождением этих адронов. Волновые функции легких адронов  $(\pi, \rho, p, n, \dots)$  и адронов, содержащих один тяжелый кварк  $(D, B, \dots)$ , уже давно являются предметом интенсивного изучения. Однако, долгое время не существовало работ, целью которых было бы изучение волно-

вых функций мезонов ( $\eta_c, J/\Psi, B_c, Y_b, \dots$ ), содержащих два тяжелых кварка.

Одной из целей представленной диссертационной работы является изучение эксклюзивных процессов рождения тяжелых кваркониев. В частности, в диссертационной работе представлены первые систематические исследования волновых функций чармониев. Используя результаты этих исследований, предложены модели этих функций. Модели волновых функций будут применены для расчетов процессов рождения чармониев, которые могут быть измерены на современных экспериментах. Главным результатом исследований такого рода является построение, использование и проверка полноценной альтернативы нрКХД. Отметим, что большинство из представленных исследований были проведены впервые и являются основой для дальнейшего использования метода РАСК для описания процессов эксклюзивного рождения чармониев.

### Электромагнитные формфакторы легких мезонов

До недавнего времени метод РАСК применялся для изучения различных эксклюзивных процессов с рождением легких мезонов. Одним из объектов, для изучения которого этот метод впервые и был разработан, является электромагнитный формфактор пиона. Так, используя РАСК, нетрудно получить асимптотику при  $Q^2 \rightarrow \infty$  для формфактора пиона:

$$F_\pi^{\text{hard}}(Q^2) = \frac{8\pi\alpha_s(Q^2)}{9} \int_0^1 dx \int_0^1 dy \frac{\phi_\pi(x)\phi_\pi(y)}{xyQ^2} = \frac{8\pi\alpha_s(Q^2)f_\pi^2}{Q^2}.$$

Однако экспериментальные данные, полученные в области до  $Q^2 < 10 \text{ ГэВ}^2$ , показывают, что формфактор пиона еще очень далек от своего теоретического предела при  $Q^2 \rightarrow \infty$ . В связи с этим, чрезвычайно актуальным является проведение надежных вычислений электромагнитных формфакторов легких мезонов в областях переданного импульса  $Q^2$ , где эти формфакторы еще не достигли своих асимптотических значений.

В диссертационной работе проведен анализ трех-точечных правил сумм КХД с учетом радиационных  $\alpha_s$  поправок с целью определения электромагнитных формфакторов  $\pi$ - и  $\rho$ -мезонов. Главным

результатом, полученным в этой работе, является явное аналитическое выражение для радиационных КХД поправок к двойной дисперсионной плотности, являющейся одним из основных компонентов в формулировке правил сумм КХД для электромагнитных формфакторов пиона и  $\rho$ -мезона. Следует отметить, что такое вычисление проведено впервые.

Хотелось бы подчеркнуть, что учет радиационных поправок очень важен для систематического анализа, так как только таким образом можно учесть одновременно жесткий и мягкий вклад в формфакторе пиона. Более того, численное значение поправок достаточно велико и их необходимо учитывать для получения надежным теоретических предсказаний.

### **Мнимые части формфакторов легких мезонов**

Хорошо известно, что теория сильных взаимодействий КХД сама по себе не может привести к возникновению эффектов  $CP$ -нарушения. Следствием этого факта является то, что формфакторы сильных взаимодействий всегда можно определить таким образом, чтобы они были действительными. Однако, помимо сильного взаимодействия, существует слабое взаимодействие, которое, в следствии присутствия  $CP$ -нарушения, может привести к появлению мнимых частей в формфакторах. Так в Стандартной Модели (СМ)  $CP$ -нарушающие эффекты, дающие мнимую поправку в формфактор, появляются только за счет ненулевой фазы в матрице Кабаяши-Москава. Стоит отметить, что механизм  $CP$ -нарушения предложенный в СМ не может объяснить всех проявлений  $CP$ -нарушения. Поэтому, можно ожидать, что существует еще один источник  $CP$ -нарушения, который пока еще не видели на современных экспериментах, но который может привести к появлению мнимых частей формфакторов.

Одним из способов увидеть  $CP$ -нарушение, которое не может быть объяснено в рамках СМ – изучение мнимых частей формфакторов адронов. Может сложиться впечатление, что на эксперименте будет очень сложно увидеть маленькую мнимую часть на фоне большой действительной части. И это действительно так, если изучать такие величины как ширины распадов, распределение по продуктам

распадов конечных частиц. Однако, оказывается, что в некоторых процессах, появляется возможность измерения физических величин, которые чрезвычайно чувствительны к мнимым частям формфакторов, а значит и к новым механизмам  $CP$ -нарушения. Такими физическими величинами, которые изучаются в представленной диссертационной работе, являются поперечная поляризация лептонов в различных мезонных распадах и  $T$ -нечетная корреляция в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0 l \nu \gamma$ .

Основной проблемой при изучении поперечной поляризации и  $T$ -нечетной корреляции является эффекты взаимодействия в конечном состоянии. Эффекты такого рода приводят к появлению ложного эффекта. Поэтому для правильного изучения указанных величин, необходимо вычислить мнимые поправки к формфакторам мезонов, к которым приводит взаимодействие в конечном состоянии. В представленной диссертационной работе проведено изучение мнимых частей формфакторов, к которым приводит взаимодействие в конечном состоянии для различных процессов и различных величин, которые чувствительны к эффектам  $CP$ -нарушения. Для некоторых процессов также проведено изучение возможных эффектов новой физики в мнимые части формфакторов.

Измерение поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu \nu \gamma$  проводится на эксперименте КЕК-Е246. Кроме того, планируется измерение поперечной поляризации на эксперименте JHF с точностью достаточной, чтобы измерить вклад СМ. Поэтому, особо важно получить надежный результат для исследуемой величины в рамках СМ. Измерение  $T$ -нечетной корреляции проводится на эксперименте ОКА (г. Протвино). Таким образом, можно сказать, что изучение поперечной поляризации и  $T$ -нечетной корреляции дает теоретический фундамент указанным экспериментам.

### **Основные цели работы**

Основной целью диссертационной работы является изучение следующих проблем:

1. Изучение свойств волновых функций  $1S, 2S, 1P$  волновых чармониев. Построение моделей этих волновых функций, которые



- могут быть использованы при вычислении процессов эксклюзивного рождения чармониев.
2. Использование построенных моделей для изучения различных процессов рождения чармониев в рамках метода РАСК. Изучение различных процессов рождения чармониев в рамках других методов и сравнение результатов с результатами РАСК.
  3. Проведение расчета электромагнитных формфакторов  $\pi$ - и  $\rho$ -мезонов в рамках правил сумм КХД с учетом радиационных поправок к двойной дисперсионной плотности.
  4. Изучение мнимых частей формфакторов процесса  $K^+ \rightarrow \mu\nu\gamma$ , которые появляются за счет эффекта взаимодействия в конечном состоянии. Вычисление поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu\nu\gamma$ , получение аналитического выражения для этого вклада. Сравнение полученных численных значений с предсказаниями различных расширений СМ.
  5. Изучение мнимых частей формфакторов процесса  $K^+ \rightarrow \pi^0\mu\nu\gamma$ , которые появляются как за счет эффекта взаимодействия в конечном состоянии, так и за счет возможного вклада новой физики. Вычисление  $T$ -нечетной корреляции в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0l\nu\gamma$ , получение аналитического выражения для вклада СМ.
  6. Оценка вклада эффекта взаимодействия в конечном состоянии в поперечную поляризацию лептона в распадах  $B \rightarrow Dl\nu_l$ . Сравнение этого эффекта с возможными проявлениями новой физики.

### **Научные результаты и новизна работы**

1. В лидирующем приближении разложения по скорости относительного движения проведено изучение парного рождения дважды тяжелых дикварков в процессах  $e^+e^-$  аннигиляции. Полученные сечения говорят о том, что на современных В-фабриках вряд ли можно будет обнаружить дважды тяжелые барионы.

2. Впервые, в рамках простых моделей с применением кулоновских волновых функций проведено изучение влияния относительного движения кварк-антикварковой пары в чармониях на величину сечений процессов:  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi\eta'_c, \psi'\eta_c, \psi'\eta'_c, J/\Psi\chi_{c0}, \psi'\chi_{c0}, \chi_{b0} \rightarrow J/\Psi J/\Psi, \chi_{b2} \rightarrow J/\Psi J/\Psi$ . Этими исследованиями показано, что учет относительного движения кварк-антикварковой пары в мезоне значительно увеличивает сечение процессов рождения. Последний факт может быть использован для устранения противоречия между теоретическими предсказаниями и экспериментальными измерениями сечений процессов двойного рождения чармониев на В-фабриках. Кроме того, показано, что свойства волновых функций чармониев очень важны для получения надежных предсказаний сечений рождения этих частиц.
3. В рамках развитых методов рассмотрен процесс рождения мезона  $X(3940)$  в процессе  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi X(3940)$  на эксперименте Belle. Рассмотрены следующие гипотезы о природе мезона  $X(3940)$ :  $X(3940) = \eta_c(3S), \chi_{c0}(2P), \chi_{c1}(2P), \chi_{c2}(2P)$ . В исследовании показано, что единственная гипотеза, которая находится в согласии со всеми экспериментальными данными:  $X(3940) = \eta_c(3S)$ .
4. В рамках соотношения дуальности между кварковыми и физическими ширинами процессов рождения, проведен расчет ширины процессов  $\chi_{b0} \rightarrow J/\Psi J/\Psi, \chi_{b2} \rightarrow J/\Psi J/\Psi$ .
5. Впервые проведено детальное изучение волновых функций  $1S, 2S, 1P$ -волновых чармониев как лидирующего так и нелидирующего твистов. Используя результаты изучения, построены модели  $1S, 2S, 1P$ -волновых чармониев, которые могут быть использованы при расчете различных процессов рождения частиц. Проведено сравнение предложенных моделей с моделями волновых функций из работ различных научных групп и показано, что, на сегодняшний день, модели, предложенные в диссертационной работе, наиболее полно отражают все известные свойства волновых функций чармониев.

6. Используя модели волновых функций чармониев, представленные в настоящей диссертационной работе, в рамках метода РАСК проведен расчет сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi\eta_c, J/\Psi\eta'_c, \psi'\eta_c, \psi'\eta'_c$ . Показано, что учет относительного движения кварков в чармонии с помощью волновых функций, а также учет лидирующих логарифмических радиационных поправок с помощью ренормгрупповых методов, позволяют разрешить противоречие между теорией и экспериментом. Отметим, что эти выводы находятся в согласии с результатами, полученными в рамках альтернативного подхода: нрКХД, но только для одного процесса:  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi\eta_c$ . Таким образом, впервые в рамках метода РАСК удалось устранить разногласия между теорией и экспериментом сразу для четырех процессов.
7. Используя формулу, полученную в рамках метода РАСК для процессов  $e^+e^- \rightarrow PV$  рождения чармониев, проведено изучение процессов рождения легких псевдоскалярных и векторных мезонов. Показано, что метод РАСК правильно предсказывает асимптотическое поведение при  $s \rightarrow \infty$ . Результаты расчета находятся в согласии с экспериментальными данными. Таким образом показано, что метод разложения амплитуды на световом конусе универсальный метод, который может быть использован для любых мезонов, если известна волновая функция этих мезонов.
8. В рамках метода РАСК проведен расчет процессов:  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi J/\Psi, J/\Psi\psi', \psi'\psi'$  с использованием моделей волновых функций, предложенных в диссертационной работе. Результаты расчета находятся в согласии с существующими экспериментальными данными.
9. В рамках метода РАСК проведен расчет процессов:  $e^+e^- \rightarrow H + \gamma, H = \eta_c, \eta'_c, \chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$  в приближении лидирующего твиста с использованием моделей волновых функций, предложенных в диссертационной работе. Результаты расчета показывают, что указанные процессы могут быть обнаружены на В-фабриках.
10. В рамках метода РАСК проведен расчет процессов двойного рождения чармониев в эксклюзивных распадах боттомониев с

положительной зарядовой четностью в приближении лидирующего твиста. Результаты расчета показывают, что указанные процессы могут быть обнаружены на В-фабриках и на эксперименте ЛНС.

11. В рамках метода РАСК проведено изучение сильно подавленных процессов  $\eta_b \rightarrow J/\Psi J/\Psi$ ,  $J/\Psi \psi'$ ,  $\psi' \psi'$ . Результаты расчета показывают, что эти процессы могут быть обнаружены на эксперименте ЛНС.
12. Исследования проведенные в диссертационной работе показывают, что метод РАСК является полноценной альтернативой нрКХД. Более того, при описании процессов рождения РАСК обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с нрКХД. В частности, в рамках метода РАСК можно легко учесть релятивистские и лидирующие логарифмические радиационные поправки к амплитуде. Эти преимущества позволяют говорить о том, что метод разложения амплитуды на световом конусе лучше чем нрКХД подходит для описания различных эксклюзивных процессов.
13. Впервые проведен расчет радиационных поправок к двойной дисперсионной плотности для корреляторов:  $VVV, VAA, VPP$ , где  $V$  – векторный ток,  $A$  – аксиальный ток,  $P$  – псевдоскалярный ток. Показано, что коллинеарные расходимости в выражениях для дисперсионных плотностей сокращаются.
14. Используя выражение для радиационных поправок, в рамках правил сумм КХД проведен расчет электромагнитных формфакторов  $\pi$ - и  $\rho$ -мезонов. Результаты расчета формфакторов находятся в согласии с существующими экспериментальными данными.
15. Рассмотрен эффект взаимодействия в конечном состоянии, который приводит к появлению мнимых частей формфакторов и ненулевому вкладу в поперечную поляризацию мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu \nu \gamma$  в рамках СМ. Для вычисления амплитуды процесса использована киральная теория возмущений на  $O(p^4)$ . Получено аналитическое выражение для этого вклада, в котором исправлены ошибки предыдущих работ.

16. Проведен расчет поправок  $O(p^6)$  к мнимым частям формфакторов и поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu\nu\gamma$  в рамках СМ.
17. Впервые проведен расчет вклада СМ в мнимые части формфакторов и в  $T$ -нечетную корреляцию в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0\mu\nu\gamma$ , которая является эффективным методом поиска новой физики. Доказана малость фона СМ, что и делает поиск новой физики эффективным. Так же как и в случае поперечной поляризации мюона в распадах каонов, расчет проведен с помощью киральной теории возмущений.
18. Помимо расчета фона СМ, проведен анализ вкладов различных расширений СМ в исследуемую величину. Показано, что  $T$ -нечетная корреляция особо чувствительна к моделям, которые дают  $CP$ -нарушающий вклад в аксиальный и векторный сектор эффективного лагранжиана. Поиск новой физики в скалярном и псевдоскалярном секторе эффективного лагранжиана не имеет смысла, т.к. данные, полученные при анализе поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0\mu\nu$ , позволяют поставить очень жесткое ограничение на исследуемую величину. Таким образом, впервые проведено полное изучение  $T$ -нечетной корреляции.
19. Поперечная поляризация лептона в распадах  $B \rightarrow D\ell\nu$  чрезвычайно чувствительна к поиску  $CP$ -нарушающих взаимодействий в хиггсовском секторе. Однако, для полного исследования этого вопроса необходимо получить вклад СМ. В диссертационной работе впервые проведен расчет величины этого вклада в мнимые части формфакторов и поперечную поляризацию лептона. При расчете использовалась эффективная теория тяжелых кварков.

### Научная и практическая ценность

Впервые проведено исследование волновых функций  $1S$ ,  $2S$ ,  $1P$ -волновых чармониев. На основании проведенных исследований получены некоторые свойства внутреннего движения кварк-антикварковой пары внутри чармониев, которые могут быть ис-

пользованы для дальнейшего исследования структуры чармониев. На основании проведенных исследований построены модели волновых функций, которые могут быть использованы при расчетах различных процессов рождения чармониев.

Проведен расчет различных эксклюзивных процессов рождения чармониев, в рамках метода разложения амплитуды на световом конусе. Все результаты расчета находятся в согласии с существующими экспериментальными данными. Этим показана эффективность нового метода и его преимущества по сравнению с методом нрКХД, что дает возможность его дальнейшего широкого использования в исследованиях различных процессов рождения чармониев. Результаты расчета многих процессов, представленные в диссертационной работе, показывают реальную возможность изучения этих процессов на современных экспериментах (В-фабрики, ЛНС), чем закладывается теоретический фундамент для подобных экспериментальных работ.

Учет радиационных поправок к двойной дисперсионной плотности, входящей в правила сумм КХД дают возможность сделать предсказание зависимости электромагнитного формфактора пиона в области средних значений переданного импульса пиона. Этот вклад необходимо учитывать, т.к. в этой области  $\alpha_s$  поправки сравниваются с лидирующим вкладом. Предсказания для формфактора пиона, полученные таким образом, могут быть использованы в решении различных теоретических задач. Кроме того, аналитическое выражение двойной дисперсионной плотности так же является результатом, который может быть использован в различных работах.

Аналитическое выражение для поперечной поляризации мюона в распаде  $K^+ \rightarrow \mu\nu\gamma$ , может быть использовано в экспериментах КЕК-Е246 и JHF. Где, для изучения эффектов новой физики, просто необходимо знать как можно точнее фоновый вклад СМ в исследуемую величину.

Рассмотрение вкладов СМ и различных расширений СМ в  $T$ -нечетную корреляцию дает теоретическую основу эксперименту ОКА(г. Протвино), а так же другим возможным экспериментам, целью которых будет являться поиск новой физики с помощью асимметрии  $A_\xi$ .

Вычисление поперечной поляризации лептона в распадах  $B \rightarrow D\ell\nu$  может быть использовано в будущих экспериментах, целью которых является поиск новой физики в хиггсовском секторе различных расширений СМ.

#### **Апробация диссертации**

Представленные на защиту результаты докладывались на Семинарах ОТФ ИФВЭ, ИТЭФ, ОИЯИ, ИЯИ; на многочисленных международных и российских конференциях и научных школах, в том числе на научной конференции МФТИ, Научно-Технической конференции МИФИ (2002, 2005 г.), конференции Научно-Образовательного центра CRDF (2003, 2004 г.), конференции молодежи в науке г. Саров (2008, 2010 г.), российских научных сессиях-конференциях секции ЯФ ОФН РАН (2005, 2007, 2008, 2009 г.), на международных конференциях Кварки (2006, 2008, 2010 г.), на международных Ломоносовских конференциях МГУ по физике элементарных частиц (2007, 2009 г.), на международных конференциях «QCD at work 2007», Workshop on Heavy Quarkonium (2007, 2010 г.), 2nd Workshop On Hadron Structure And QCD: From Low To High Energy, «Confinement2008», II Helmholtz International Summer School.

**Публикации.** Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в российских и зарубежных журналах в виде статей (см. Список литературы [1-30]).

#### **Содержание работы**

**Во введении** (Глава 1) показана актуальность проведения теоретических исследований процессов жесткого эксклюзивного рождения чармониев. В большинстве современных исследований такого рода применяется метод нрКХД. Во введении приведено краткое описание этого метода и обоснована необходимость разработки полноценной альтернативы нрКХД для описания процессов рождения чармониев. В качестве альтернативы рассматривается метод РАСК. В этой главе дано краткое описание метода РАСК и показано, что РАСК имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с нрКХД.

Помимо процессов рождения чармониев, в главе обосновывается важность получения надежных предсказаний для электромагнитного формфактора пиона в широком диапазоне переданного импульса. Показано, что одним из самых надежных методов изучения формфакторов пиона являются правила сумм КХД, где важнейшим элементом является двойная дисперсионная плотность, полученная в диссертационной работе.

Последней темой рассмотренной в диссертационной работе, является мнимые поправки к формфакторам различных эксклюзивных процессов. Во введении обосновывается важность проведения исследований мнимых частей формфакторов для поиска эффектов СР-нарушения, которые нельзя объяснить в рамках Стандартной Модели. Показано, что в рамках СМ эффект электромагнитного взаимодействия в конечном состоянии приводит к появлению мнимых частей формфакторов. Для поиска возможного проявления новой физики последний эффект необходимо точно рассчитать, что и является одной из целей диссертационной работы.

**В главе 2** в лидирующем приближении разложения по скорости относительного движения проведено изучение парного рождения дважды тяжелых дикварков в процессах  $e^+e^-$  аннигиляции. Известно, что, изучая процесс рождения дважды тяжелых дикварков, можно оценить сечение рождения соответствующих им дважды тяжелых барионов с помощью фрагментационного механизма. В диссертационной работе получены следующие значения сечений  $\sigma \leq 2$  фб, что слишком мало для того чтобы обнаружить дважды тяжелые барионы на современных В-фабриках.

Помимо этого, в рамках простых моделей проведено изучение влияния относительного движения кварк-антикварковой пары в чармониях на величину сечения процессов:  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi\eta'_c, \psi'\eta_c, \psi'\eta'_c, J/\Psi\chi_{c0}, \psi'\chi_{c0}, \chi_{b0} \rightarrow J/\Psi J/\Psi, \chi_{b2} \rightarrow J/\Psi J/\Psi$ . Этими исследованиями показано, что учет относительного движения кварк-антикварковой пары в мезоне значительно увеличивает сечение процессов рождения. Таким образом, противоречие теории и экспериментов по двойному рождению чармониев на В-фабриках может быть сильно ослаблено, либо полностью устранено, если учесть от-



носительное движение кварков в мезонах. Такой учет может быть проведен систематически в рамках метода разложения амплитуды рождения на световом конусе.

В главе 2 также показано, что главными составляющими при расчете любых процессов в рамках метода разложения амплитуды на световом конусе являются волновые функции конечных адронов. Плохое знание свойств этих функций приводит к существенной неопределенности в величине сечения процессов рождения. Поэтому для получения надежных значений сечений процессов рождения необходимо провести изучение свойств волновых функций и построить модели этих функций (что сделано в главе 3), которые могут быть использованы при изучении различных процессов рождения.

Используя развитые методы, рассмотрен процесс рождения мезона  $X(3940)$  в процессе  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi X(3940)$  на эксперименте Belle. Основная проблема, с которой сталкиваются исследователи новых мезонов со скрытым очарованием, связана с тем, что, как правило, известна масса, но не известны квантовые числа вновь открытого мезона. В диссертационной работе сделано предположение о том, что мезон  $X(3940)$  является возбужденным состоянием мезонов, которые уже наблюдались на установке Belle. Таким образом, рассмотрены две гипотезы:  $X(3940) = \eta_c''$  и  $X(3940)$  один из  $\chi'_{c0}, \chi'_{c1}, \chi'_{c2}$  мезонов. В результате проведенного исследования показано, что единственная гипотеза, которая находится в согласии со всеми экспериментальными данными:  $X(3940) = \eta_c''$ . Расчет сечения рождения  $X(3940)$  дает следующий результат

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\psi X(3940)) \simeq 11 \pm 3 \text{ фб.}$$

Экспериментальный результат:  $\sigma \times Br(X(3940) > 2 \text{ заряженные частицы}) = (10.6 \pm 2.5 \pm 2.4) \text{ фб}$  находится в хорошем согласии с предсказанием теории.

**В главе 3** представлены результаты изучения волновых функций  $1S, 2S, 1P$ -волновых чармониев как лидирующего так и нелидирующего твистов. Исследование было проведено в рамках 3-х подходов: использование потенциальных моделей, использование нерелятивистской КХД и использование метода правил сумм КХД. Резуль-

таты, полученные в рамках всех трех методов, находятся в разумном согласии друг с другом.

Стоит отметить, что в лидирующем приближении разложения волновых функций по относительной скорости движения кварков в чармонии, волновые функции всех S- и P-волновых чармониев однозначно выражаются через одну универсальную волновую функцию. Что же касается волновых функций нелидирующего твиста, в главе 3 показано, что если пренебречь вкладом высших фоковых состояний, то волновые функции нелидирующего твиста однозначно выражаются через волновые функции лидирующего твиста. Таким образом, для того чтобы задать волновые функции чармониев, необходимо знать одну волновую функцию для каждого мультиплета.

Используя полученные результаты исследований волновых функций, построены следующие модели этих функций

$$\begin{aligned}\phi_{1S}(\xi, \mu \sim m_c) &= c(\beta_{1S})(1 - \xi^2) \exp\left(-\frac{\beta_{1S}}{1 - \xi^2}\right), \\ \phi_{2S}(\xi, \mu \sim m_c) &= c(\alpha_{2S}, \beta_{2S})(1 - \xi^2)(\alpha_{2S} + \xi^2) \exp\left(-\frac{\beta_{2S}}{1 - \xi^2}\right), \\ \phi_{1P}(\xi, \mu \sim m_c) &= c(\beta_{1P})(1 - \xi^2) \xi \exp\left(-\frac{\beta_{1P}}{1 - \xi^2}\right),\end{aligned}$$

где параметры волновых функций определены следующим образом:  $\beta_{1S} = 3.8 \pm 0.7$ ,  $\alpha_{2S} = 0.03_{-0.03}^{+0.32}$ ,  $\beta_{2S} = 2.5_{-0.8}^{+3.2}$ ,  $\beta_{1P} = 3.4_{-0.9}^{+1.5}$ , а константы  $c$  определяются условиями нормировки.

Построенные модели обладает рядом достаточно интересных свойств: улучшение точности модели с ростом характерной энергии эксклюзивного процесса, появление релятивистского «хвоста» волновой функции при увеличении масштаба и нарушение правил оценки матричных элементов нерелятивистской КХД. Результаты этих вычислений могут быть использованы в предсказаниях различных сечений эксклюзивных реакций с помощью полученных волновых функций, а также возможна оценка ошибок связанных с плохим знанием волновых функции мезонов на световом конусе.

В заключение главы 3 проведено сравнение моделей волновых функций, предложенных в диссертационной работе, с моделями волновых функций, предложенных другими авторами. На основании

проведенного сравнения можно сделать вывод: исследования волновых функций, представленные в диссертационной работе являются лучшими на сегодняшний день. Эти модели наиболее полно, среди существующих, учитывают динамику кварк-антикварковой пары в чармониях и более всего подходят для расчета процессов эксклюзивного рождения чармониев.

**В главе 4**, используя модели волновых функций чармониев, предложенные в главе 3, в рамках метода РАСК проведен расчет сечений процессов эксклюзивного рождения чармониев. В частности, проведен расчет сечений процессов  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi\eta_c, J/\Psi\eta'_c, \psi'\eta_c, \psi'\eta'_c$ .

Результаты расчета представлены в Табл. 1. Из таблицы видно, что результаты расчета, проведенного в настоящей главе, согласуются с результатами полученными в экспериментах Belle и Babar. Однако, как видно из той же таблицы, неопределенности в расчетах достаточно большие. Основными источниками неопределенностей являются наши плохие теоретические знания о радиационных поправках и о возможности их суммирования.

$H_1 H_2$	$\sigma_{Exp} \times Br_{H_2 \rightarrow charged > 2}(\text{фб})$		$\sigma_{\text{нрКХД}}(\text{фб})$	$\sigma_{LC}(\text{фб})$
	Belle	BaBar		
$J/\Psi\eta_c$	$25.6 \pm 2.8 \pm 3.4$	$17.6 \pm 2.8^{+1.5}_{-2.1}$	$3.78 \pm 1.26$	$14.4^{+11.2}_{-9.8}$
$\psi'\eta_c$	$16.3 \pm 4.6 \pm 3.9$	—	$1.57 \pm 0.52$	$10.4^{+9.2}_{-7.8}$
$J/\Psi\eta'_c$	$16.5 \pm 3.0 \pm 2.4$	$16.4 \pm 3.7^{+2.4}_{-3.0}$	$1.57 \pm 0.52$	$13.0^{+12.2}_{-11.0}$
$\psi'\eta'_c$	$16.0 \pm 5.1 \pm 3.8$	—	$0.65 \pm 0.22$	$9.0^{+9.7}_{-8.5}$

Таблица 1. Вторая и третья колонки содержат сечения, измеренные на экспериментах Belle и Babar. Четвертая колонка содержит результаты, полученные в рамках лидирующего приближения нрКХД. Последняя колонка содержит результаты, полученные в диссертационной работе.

В результате проведенного исследования можно сделать вывод о том, что одновременный учет релятивистских и лидирующих логарифмических радиационных поправок значительно увеличивает сечения исследуемых процессов и просто необходим для того, чтобы получить результат расчета согласованный с экспериментальными

данными. Другими словами, радиационный и релятивистские поправки играют ключевую роль при изучении процессов рождения чармониев в жестких эксклюзивных процессах.

Используя формулу, полученную в рамках метода РАСК для процессов  $e^+e^- \rightarrow \rho\eta, \phi\eta, \rho\eta', \phi\eta'$  рождения чармониев, проведено изучение процессов рождения легких псевдоскалярных и векторных мезонов. Показано, что результаты расчета находятся в согласии с экспериментальными данными. Последний факт позволяет сделать следующий вывод: метод разложения амплитуды на световом конусе действительно может быть использован для любых мезонов, если известна ВФ этих мезонов. Отметим также, что этот факт является следствием факторизации. Более детально: факторизация выделяет жесткий подпроцесс, который не зависит, от рождаемого мезона, и волновые функции, которые зависят структуры мезона и не зависят от конкретного процесса.

Помимо изучения рождения векторного и псевдоскалярного мезонов в главе 4 проведено изучение процессов рождения двух векторных мезонов  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi J/\Psi, J/\Psi\psi', \psi'\psi'$ . При этом получены следующие значения сечений этих процессов:

$$\begin{aligned}\sigma(e^+e^- \rightarrow J/\Psi J/\Psi) &= 2.02 \pm 0.25 \text{ фб}, \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow J/\Psi\psi') &= 1.32 \pm 0.16 \text{ фб}, \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow \psi'\psi') &= 0.20 \pm 0.06 \text{ фб}.\end{aligned}$$

Эти результаты находятся в согласии с экспериментальными данными.

В рамках метода РАСК также проведено изучение процессов:  $e^+e^- \rightarrow H + \gamma, H = \eta_c, \eta'_c, \chi_{c0}, \chi_{c1}, \chi_{c2}$  в приближении лидирующего твиста. Для процессов рождения  $\eta_c, \eta'_c$  мезонов учтены однопетлевые радиационные поправки. В результате исследования указанных процессов получены следующие значения сечений

$$\begin{aligned}\sigma(e^+e^- \rightarrow \eta_c + \gamma) &= 41.6 \pm 14.1 \text{ фб}, \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow \eta'_c + \gamma) &= 24.2 \pm 14.5 \text{ фб}, \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi_{c0} + \gamma) &= 6.1 \pm 3.9 \text{ фб},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma(e^+e^- \rightarrow \chi_{c1} + \gamma) &= 24.2 \pm 13.3 \text{ фб}, \\ \sigma(e^+e^- \rightarrow \chi_{c2} + \gamma) &= 12.0 \pm 7.4 \text{ фб}.\end{aligned}$$

К сожалению, измерения сечений этих процессов не проводилось. Однако можно утверждать, что значения сечений достаточно велики и эти процессы можно увидеть на современных В-фабриках.

В рамках метода РАСК проведен расчет процессов двойного рождения чармониев в эксклюзивных распадах боттомониев с положительной зарядовой четностью в приближении лидирующего твиста. К сожалению, в настоящее время не выполнено измерение ширины процессов, расчет которых проведен в главе 4. Однако такого рода измерения планируется провести в ближайшем будущем на В-фабриках и на ЛНС. Изучение распада  $\eta_b$  на два векторных мезона является важной и интересной задачей. Особый интерес к этой задаче связан с тем, что с помощью этого процесса на ЛНС планировалось открыть  $\eta_b$ -мезон. Долгое время не было теоретического описания распада  $\eta_c \rightarrow V_1 V_2$ , так как этот распад на два порядка подавлен по сравнению с распадами боттомониев рассмотренными в предыдущем параграфе, а расчет сильно подавленных процессов часто сопровождается серьезными теоретическими трудностями. В конце главы 4 проведено изучение процессов  $\eta_b \rightarrow J/\Psi J/\Psi$ ,  $J/\Psi \psi'$ ,  $\psi' \psi'$  и получены следующие результаты

$$\begin{aligned}Br(\eta_b \rightarrow J/\psi J/\psi) &= (6.2 \pm 3.5) \times 10^{-7}, \\ Br(\eta_b \rightarrow J/\psi \psi') &= (10 \pm 6) \times 10^{-7}, \\ Br(\eta_b \rightarrow \psi' \psi') &= (3.7 \pm 2.8) \times 10^{-7}.\end{aligned}$$

Эти величины достаточно велики и, поэтому, можно надеяться, что эти распады можно будет увидеть на эксперименте ЛНС.

**В главе 5** представлены аналитические выражения для радиационных поправок к двойной дисперсионной плотности для корреляторов:  $VVV, VAA, VPP$ , где  $V$  – векторный ток,  $A$  – аксиальный ток,  $P$  – псевдоскалярный ток. Эти выражения позволяют сформулировать правила сумм КХД для электромагнитных формфакторов  $\pi$ - и  $\rho$ -мезонов с учетом радиационных поправок. Используя эти

правила сумм, произведен расчет зависимости электромагнитных формфакторов  $\pi$ - и  $\rho$ -мезонов от величины переданного импульса.

Особо отметим изучение электромагнитного формфактора пиона в рамках правил сумм КХД с помощью аксиальных интерполяционных токов. Для изучения этого формфактора использовалось приближение локальной дуальности правил сумм КХД. Такой подход позволил получить значения формфактора в широком диапазоне переданного импульса. Результат расчета электромагнитного формфактора пиона приведен на Рис. 1. Как видно из этого рисунка, результаты расчета находятся в согласии с существующими экспериментальными данными.

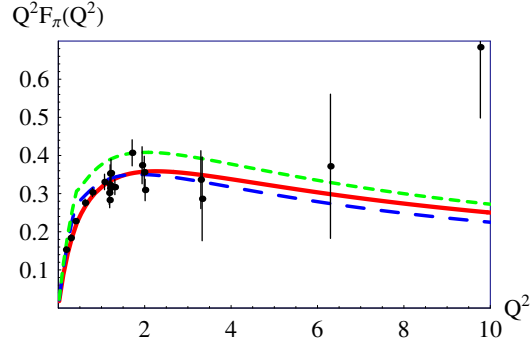


Рис. 1. Формфактор пиона при  $Q^2 \geq 0.5$  ГэВ<sup>2</sup>. Сплошная линия соответствует бегущей константе связи в правилах сумм. Короткая штриховая линия соответствует формфактору пиона полученному при пороге континуума  $s_0 = 0.65$  ГэВ<sup>2</sup>. Длинная штриховая линия соответствует формфактору пиона полученному при пороге континуума  $s_0 = 0.6$  ГэВ<sup>2</sup>.

Интересно также провести исследование вклада радиационных поправок в электромагнитный формфактор пиона. На Рис. 2 представлена  $Q^2$ -зависимость различных вкладов в электромагнитный формфактор пиона. Из этого рисунка видно, что в области  $Q^2 < 20$  ГэВ<sup>2</sup> вклад лидирующего приближения правил сумм КХД больше

вклада радиационным поправкам. Таким образом, можно утверждать, что выход в асимптотический режим для формфактора пиона произойдет не раньше переданного импульса  $Q^2 \sim 20 \text{ ГэВ}^2$ .

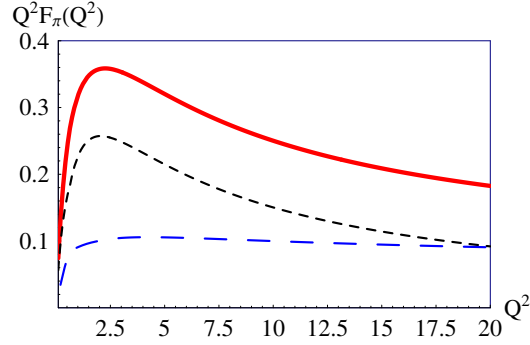


Рис. 2.  $Q^2$ -зависимость электромагнитного формфактора пиона. Короткая штриховая линия соответствует вкладу правил сумм КХД без учета радиационных поправок. Длинная штриховая линия соответствует вкладу радиационных поправок из правил сумм КХД. Сплошная линия соответствует сумме двух вкладов.

**В главе 6** проведен расчет мнимых частей формфакторов и поперечной поляризации мюона в  $K \rightarrow \mu\nu\gamma$  распаде в рамках СМ за счет электромагнитного взаимодействия в конечном состоянии. Все расчеты проведены на уровне  $O(p^4)$  киральной теории возмущений. Для оценки поправок к этому результату, проведен расчет мнимых частей формфакторов и поперечной поляризации с точностью  $O(p^6)$  в рамках модели векторно-мезонной доминантности. Результаты расчета показывают, что поправки  $O(p^6)$  к результату  $O(p^4)$  слабо меняют результат.

Значение средней поперечной поляризации мюона  $\langle P_T^{SM} \rangle$ , полученное интегрированием поперечной поляризации по физической области с учетом ограничения по энергии фотона  $E_\gamma > 20 \text{ МэВ}$ ,

составляет величину:

$$\langle P_T^{SM} \rangle = 5.63 \cdot 10^{-4} .$$

Помимо изучения распада  $K \rightarrow \mu\nu\gamma$ , рассмотрен эффект взаимодействия в конечном состоянии в рамках СМ, который приводит к появлению мнимых частей формфакторов в распадах  $K^+ \rightarrow \pi^0 l\nu\gamma, l = \mu, e$ . Для наблюдения этого эффекта на эксперименте введена интегральная физическая величина, которая определяется формулой:

$$A_\xi = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-}, \quad (1)$$

где  $N_+$  и  $N_-$  – количество событий с  $\xi > 0$  и  $\xi < 0$ ,  $\xi = \mathbf{q} \cdot [\mathbf{p}_l \times \mathbf{p}_\pi]/M^3$ . В главе 6 показано, что асимметрия  $A(\xi)$  чувствительна к мнимым частям формфакторов, а значит и к эффектам  $CP$ -нарушения. Помимо интегральной величины, чувствительной к мнимым частям формфакторов, в диссертационной работе введена дифференциальная характеристика, которая определяется нечетной по  $\xi$  частью в дифференциальной ширине распада  $\sim dBr_{odd}/d\xi$  (см. Рис. 3)

Величина асимметрии в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma$ :

$$A_\xi = -0.59 \times 10^{-4},$$

а в распаде  $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ :

$$A_\xi = 1.14 \times 10^{-4}.$$

Для того чтобы выяснить насколько исследуемая величина эффективна в поисках новой физики, проведено рассмотрение  $T$ -нечетной корреляции в моделях, которые описываются эффективным лагранжианом, включающим в себя скалярное, псевдоскалярное, векторное и аксиальное взаимодействие.

Эксперимент КЕК-Е246 позволяет поставить достаточно жесткое ограничение только на скалярную и псевдоскалярную константы, оставляя без каких либо предсказаний векторный и аксиальный сектор исследуемого лагранжиана. Ограничения на эти параметры



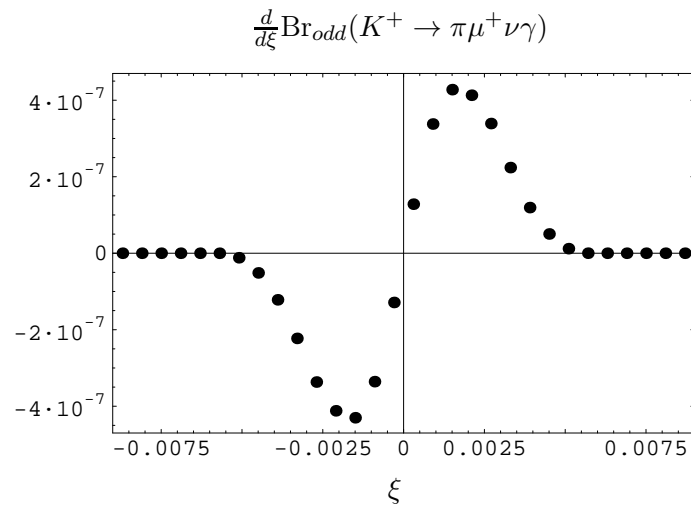
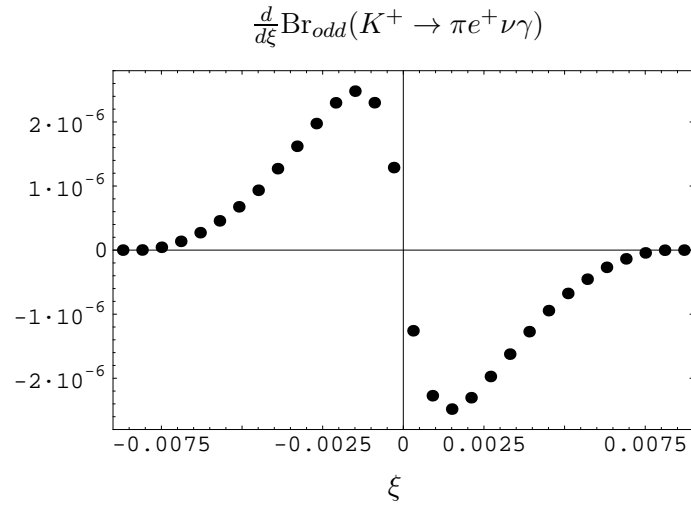


Рис. 3.  $\xi$ -нечетный вклад в  $d\text{Br}_{odd}/d\xi$  для распадов  $K^+ \rightarrow \pi \mu^+ \nu \gamma$ ,  $K^+ \rightarrow \pi e^+ \nu \gamma$

возможно будут получены в эксперименте ОКА, который стартует в ближайшее время. Результаты, полученные в диссертационной работе, показывают, что существует высокая чувствительность асимметрии  $A_\xi$  к векторному и аксиальному взаимодействию в эффективном лагранжиане. При этом для поиска этих эффектов можно использовать следующие распады  $K^+$ -мезона: распад с электроном и распад с мюоном в конечном состоянии. Учитывая ограничения на параметры  $SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)$  модели, получены следующие ограничения на  $A_\xi$ :

$$\begin{aligned} |A_\xi| &< 2.6 \times 10^{-4}, & K^+ &\rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma, \\ |A_\xi| &< 0.8 \times 10^{-4}, & K^+ &\rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e \gamma, \end{aligned}$$

что несколько больше соответствующих вкладов СМ в  $T$ -нечетную корреляцию.

Принимая во внимание результаты, полученные в работе, можно утверждать, что, при условии увеличения статистики на один порядок, планируемый эксперимент ОКА станет перспективным с точки зрения изучения векторного и аксиального секторов исследуемого лагранжиана, а асимметрия  $A_\xi$  – эффективной физической величиной для поиска новой физики.

Как было сказано выше, поперечная поляризация лептона в распаде  $B \rightarrow D l \nu$  является чувствительной физической величиной для поиска эффектов  $CP$ -нарушения в хиггсовском секторе. Долгое время существовали оценки возможных вкладов новой физики в поперечную поляризацию, но не было известно вклада СМ в исследуемую величину. В диссертационной работе впервые были проведены такие оценки и получены следующие значения поперечной поляризации:

$$\begin{aligned} P_T &= 2.60 \cdot 10^{-3} & B^0 &\rightarrow D^- \tau \nu_\tau, \\ P_T &= 2.97 \cdot 10^{-4} & B^0 &\rightarrow D^- \mu \nu_\mu, \\ P_T &= -1.59 \cdot 10^{-3} & B^+ &\rightarrow \bar{D}^0 \tau \nu_\tau, \\ P_T &= -6.79 \cdot 10^{-4} & B^+ &\rightarrow \bar{D}^0 \mu \nu_\mu \end{aligned}$$

Безусловно, точность средних значения поперечной поляризации полученные в рамках СМ вряд ли можно сравнить с исследованием

поперечной поляризации в каонном секторе, где поправки к амплитудам распада учитываются систематически с помощью киральной теории возмущений. Тем не менее, вряд ли можно ожидать, что величина поперечной поляризации сильно изменится с учетом поправок. А это позволяет сделать вывод, что поперечная поляризация в рамках СМ на два–три порядка меньше возможных ее значений в рамках различных расширений СМ. Откуда можно сделать вывод о том, что, несмотря на ряд теоретических недостатков, изучение поперечной поляризации в распадах  $B \rightarrow D\ell\nu_\ell$  чрезвычайно эффективно с точки зрения поиска эффектов новой физики.

**В Заключении** сформулированы результаты диссертации, представленной к защите, а также обоснована их научная ценность и новизна.

### Список литературы

- [1] В.В. Брагута, В.В. Киселев, А.Е. Чалов, “Парное рождение дважды тяжелых дикварков,” Яд. Физ. **65**, 1575 (2002).
- [2] В.В. Брагута, А.К. Лиходед, А.В. Лучинский, “Эксклюзивные процессы рождения и волновые функции чармониев,” принята к публикации в журнале Яд.Физ.
- [3] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “Observation potential for  $\chi_b$  at the Tevatron and CERN LHC,” Phys. Rev. D **72**, 094018 (2005).
- [4] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, ‘Excited charmonium mesons production in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} = 10.6$ -GeV,” Phys. Rev. D **72**, 074019 (2005).
- [5] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “The Processes  $e^+e^- \rightarrow J/\Psi(\chi_{c0}), \Psi(2S)(\chi_{c0})$  at  $\sqrt{s} = 10.6$ -GeV in the framework of light cone formalism,” Phys. Lett. B **635**, 299 (2006).

- [6] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “The Process  $e^+e^- \rightarrow J/\psi X(3940)$  at  $\sqrt{s} = 10.6\text{-GeV}$  in the framework of light cone formalism,” Phys. Rev. D **74**, 094004 (2006).
- [7] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “Inclusive decays  $\chi_{b0,2} \rightarrow \Psi D\bar{D} + X$  and the duality relation,” Phys. Rev. D **73**, 034021 (2006).
- [8] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “The Study of leading twist light cone wave function of  $\eta_c$  meson,” Phys. Lett. B **646**, 80 (2007).
- [9] V.V. Braguta, “The study of leading twist light cone wave functions of  $J/\Psi$  meson,” Phys. Rev. D **75**, 094016 (2007).
- [10] V.V. Braguta, “The Study of leading twist light cone wave functions of 2S state charmonium mesons,” Phys. Rev. D **77**, 034026 (2008).
- [11] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “Leading twist distribution amplitudes of P-wave nonrelativistic mesons,” Phys. Rev. D **79**, 074004 (2009).
- [12] V.V. Braguta, “Mass of nonrelativistic meson from leading twist distribution amplitudes,” Phys. Atom. Nucl. **74**, 86 (2011).
- [13] V.V. Braguta, “Double charmonium production at B-factories within light cone formalism,” Phys. Rev. D **79**, 074018 (2009).
- [14] V.V. Braguta and V. G. Kartvelishvili, “Decay  $\eta_b \rightarrow J/\psi J/\psi$  in light cone formalism,” Phys. Rev. D **81**, 014012 (2010).
- [15] V.V. Braguta, A. K. Likhoded and A. V. Luchinsky, “Double charmonium production in exclusive bottomonia decays,” Phys. Rev. D **80**, 094008 (2009).
- [16] V.V. Braguta, “The study of double vector charmonium mesons production at B-factories within light cone formalism,” Phys. Rev. D **78**, 054025 (2008).

- [17] V.V. Braguta, A.K. Likhoded and A.V. Luchinsky, “Study of exclusive processes  $e^+e^- \rightarrow VP$ ,” Phys. Rev. D **78**, 074032 (2008).
- [18] V.V. Braguta, “Exclusive  $C=+$  charmonium production in  $e^+e^- \rightarrow H + \gamma$  at B-factories within light cone formalism,” Phys. Rev. D **82**, 074009 (2010).
- [19] В.В. Брагута, А.И. Онищенко, “Электромагнитный формфактор пиона в правилах сумм КХД,” Яд. Физ. **68**, 1260 (2005).
- [20] V.V. Braguta and A.I. Onishchenko, “Pion form-factor and QCD sum rules: Case of axial current,” Phys. Lett. B **591**, 267 (2004).
- [21] V.Braguta, W.Lucha and D. Melikhov, “Pion form-factor at spacelike momentum transfers from local-duality QCD sum rule,” Phys. Lett. B **661**, 354 (2008).
- [22] V.V. Braguta and A.I. Onishchenko, “Pion form factor and QCD sum rules: Case of pseudoscalar current,” Phys. Lett.B **591**, 255, (2004).
- [23] V. V. Braguta and A. I. Onishchenko, “ $\rho$  meson form-factors and QCD sum rules,” Phys. Rev. D **70**, 033001 (2004).
- [24] В.В. Брагута, А.А. Лиходед, А.Е. Чалов, “Поперечная поляризация мюона в процессе  $K_{l2\gamma}$  за счет электромагнитного взаимодействия в конечном состоянии,” Яд. Физ. **65**, 539 (2002).
- [25] V.V. Braguta, A.E. Chalov and A.A. Likhoded, “Muon transverse polarization in the  $K_{l2\gamma}$  decay in SM,” Phys. Rev. D **66**, 034012 (2002).
- [26] V.V. Braguta, “Transverse positron polarization in the  $\mu^+ \rightarrow e^+ \bar{\nu}_\mu \nu_e$  decay in SM,” Phys. Lett. B **625**, 41 (2005).
- [27] В.В. Брагута, А.А. Лиходед, А.Е. Чалов, “Вычисление  $O(p^6)$  поправок киральной теории возмущений к поперечной поляризации мюона в распаде  $K_{l2\gamma}$ ,” Яд. Физ. **70** (2007) 386.

- [28] V.V. Braguta, A.A. Likhoded and A.E. Chalov, “T odd correlation in the  $K_{l3\gamma}$  decay,” Phys. Rev. D **65**, 054038 (2002).
- [29] V.V. Braguta, A.A. Likhoded and A.E. Chalov, “T odd correlation in the  $K^+ \rightarrow \pi l \nu \gamma$  decays beyond standard model,” Phys. Rev. D **68**, 094008 (2003).
- [30] V.V. Braguta, A.E. Chalov and A.A. Likhoded, “Lepton transverse polarization in the  $B \rightarrow D l \nu_l$  decay due to the electromagnetic final state interaction,” Phys. Rev. D **66** (2002) 074019.

*Рукопись поступила 22 июня 2011 г.*

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

В.В. Брагута

Формфакторы адронов в различных эксклюзивных процессах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 30.06.2011. Формат 60 × 84/16.  
Офсетная печать. Печ.л. 1,88. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 100. Заказ 46.  
Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2011–13, И Ф В Э, 2011

---